

# VU Research Portal

## Polarized partons in hadrons at high energy

Cotogno, S.

2018

### **document version**

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication in VU Research Portal](#)

### **citation for published version (APA)**

Cotogno, S. (2018). *Polarized partons in hadrons at high energy: The structure of hadrons from single and double parton interactions*. [PhD-Thesis - Research and graduation internal, Vrije Universiteit Amsterdam].

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

### **E-mail address:**

[vuresearchportal.ub@vu.nl](mailto:vuresearchportal.ub@vu.nl)

---

# Samenvatting

*Geen probleem is te klein of te triviaal als je  
er echt iets aan kunt doen.*

R. Feynman

De grote uitdaging van de moderne fysica is het ontdekken van de fundamentele bouwstenen van het universum, alsook begrijpen hoe die bouwstenen met wisselwerken aangaan en uiteindelijk de wereld om ons heen vormgeven. Sinds het begin van het moderne wetenschappelijke tijdperk (dit correspondeert met het begin van de 17de eeuw toen Galileo Galilei de wetenschappelijke methode introduceerde en daarmee de wetenschappelijke revolutie ontketende) is er altijd interesse geweest om verder in te zoomen op objecten om daarmee hun substructuur beter te kunnen begrijpen. De eerste hulpmiddelen die hiervoor werden gebruikt waren simpele constructies van twee gekromde lenzen, maar snel daarna werden deze vervangen door meer geavanceerde opstellingen van lenzen die uiteindelijk leidden tot de ontwikkeling van de eerste optische microscoop.

Toen wetenschappers bijna atomen konden “waarnemen”, realiseerde men zich dat microscopen niet geschikt waren om subatomaire materie te bestuderen; andere hulpmiddelen waren nodig. Zo bleek dat verstrooiingsprocessen tussen moleculen en atomen een uitstekende manier was om de subatomaire wereld te ontdekken. Het experiment van Rutherford in het eerste decennium van de 20ste eeuw vormde het eerste experiment van dit type en leidde tot de ontdekking van de structuur van het atoom. Vandaag de dag, een eeuw na de experimenten van Rutherford, worden verstrooiingsprocessen nog steeds gezien als de beste “vergrootglazen” die ooit door de

mensheid zijn ontwikkeld; ze vormen de beste manier om subatomaire en subnucleaire structuren te bestuderen.

In dit proefschrift willen we een bijdrage leveren aan het veld genaamd *hadronfysica* door de interne structuur van de subatomaire *hadronen* te bestuderen. Hadronen zijn overigens geen elementaire deeltjes, maar ze zijn wel direct opgebouwd uit elementaire (punt)deeltjes: *quarks* en *gluonen*. Hoewel ze extreem klein zijn (ongeveer honderdmiljoen keer kleiner dan een menselijke bloedcel), worden ze in het landschap van de subatomaire deeltjes als “groot” beschouwd en is het interessant om hun interne structuur beter te begrijpen. Protonen en neutronen vormen de bouwstenen van atoomkernen en daarom kunnen ze ook worden gezien als bouwstenen van het grootste deel van de zichtbare materie in ons universum.

Iets wat bijzonder is aan hadronen is dat hun “macroscopische eigenschappen, die bepaald worden door hun elementaire bouwstenen, niet direct uitgerekend kunnen worden (partonen zitten “gevangen in hadronen en zijn nog nooit individueel in experimenten waargenomen). Een voorbeeld hiervan is dat de oorsprong van protonmassa niet enkel kan worden verklaard door de massa’s van de individuele partonen op te tellen; in werkelijkheid is een ingewikkeld samenspel van dynamische contributies hiervoor verantwoordelijk.

De moeilijkheid in de beschrijving van het proton en andere hadronen in hoog-energetische verstrooiingsprocessen is de uniciteit van de interactie die het gedrag van haar bouwstenen bepaalt. De theorie die die interactie beschrijft wordt kwantumchromodynamica genoemd, of QCD. Globaal gezegd beschrijft QCD de interacties tussen de quarks en gluonen in hadronen (de *partonen*) via hun *kleurlading*. Conceptueel gezien is dit vergelijkbaar met de beschrijving van de interacties tussen elektronen via hun *elektrische lading*. Het eigenaardige aan QCD is dat de sterkte van de interactie tussen de elementaire deeltjes erg afhangt van de afstand tussen de deeltjes. De interactie is sterk op grote afstanden en wordt steeds kleiner naarmate de afstand afneemt. Indien we direct in hadronen zouden kunnen kijken op zeer kleine afstanden, dan zouden we oneindig veel partonen zien die nagenoeg vrij kunnen bewegen (de partonen “voelen elkaar niet). Dit verschijnsel in QCD wordt *asymptotische vrijheid* genoemd. Zodra de afstand toeneemt, worden asymptotisch vrije partonen vervangen door sterk gebonden systemen en omdat de interactie erg sterk is blijven de partonen “gevangen in de hadronen. Dit laatstgenoemde fenomeen wordt *confinement* genoemd.

Het idee dat een “macroscopisch object zich anders manifesteert op andere lengteschalen is iets waar wetenschappers altijd al bekend mee zijn geweest. Bijvoorbeeld, als we inzoomen op moleculen en atomen (de voornaamste objecten die door

scheikundigen en atoomfysici worden bestudeerd), dan zien we opeens elektronen en atoomkernen. Deze bouwstenen kunnen verder worden bestudeerd en vormen de hoofdbestanddelen van atomen en moleculen. Naarmate we naar nog kleinere lengteschalen gaan binnen atoomkernen, vinden we uiteindelijk de protonen en neutronen, de gebonden toestanden van de gekleurde partonen. Anders dan de gevallen waarin de substructuren vrij zijn en kunnen worden geobserveerd door steeds sterkere “vergrootglazen”, kunnen in QCD de partonen die vrijelijk in de hadronen bewegen nooit als vrije deeltjes in experimenten worden waargenomen. In een botsingsproces worden partonen uit hadronen geslagen, maar zodra ze interacties met elkaar aangaan vormen ze weer nieuwe hadronen. Het interpreteren van experimentele resultaten m.b.t. de hadronstructuur is een kunst op zich; een goede balans tussen theoretische voorspellingen en data is noodzakelijk.

Het feit dat de informatie over de interne structuur van hadronen niet heel toegankelijk is, betekent niet dat we niets over hadronen kunnen leren. Het bouwen van een theoretisch model gebaseerd op kernprincipes en symmetrie-argumenten stelt fysici in staat om hadronen te karakteriseren en te bepalen welk deel van hun interne ruimte een rol speelt in hoog-energetische processen.

De grootheden die informatie bevatten over een specifiek deel van de hadronruimte zijn *multidimensionale* functies die afhangen van kinematische variabelen die betrekking hebben op partonen. De informatie over de impuls van een parton in de bewegingsrichting van het “moederhadron” bijvoorbeeld bevat in de zogenaamde *partondistributiefuncties* (PDFs). De volledige informatie over de beweging van partonen in de driedimensionale ruimte wordt beschreven door de *transversale-impulsafhankelijke distributiefuncties* genaamd TMDs. De PDFs en TMDs bevatten alleen informatie over een *enkel parton* en verwaarlozen aspecten die te maken hebben met correlaties tussen meerdere partonen. Het laatstgenoemde wordt beschreven door *dubbel-partondistributies* (DPDs); deze distributies bevatten informatie over de gelijktijdige extractie van twee partonen uit een hadron. Deze functies kunnen worden gemeten door te zoeken naar processen waarin twee partonen gelijktijdig deelnemen aan twee hoog-energetische interacties.

Naast de kleurlading bevatten de verschillende distributiefuncties ook informatie over andere kwantumeigenschappen van partonen. Voor dit proefschrift is de belangrijkste eigenschap van partonen hun *spin*, een van de meest intrigerende kwantumeigenschappen. De spin van een elementair deeltje heeft niets te maken met een eigenschap in de fysieke ruimte (er is géén sprake van een werkelijke rotatie); het is een intrinsieke eigenschap van het deeltje. Men kan quarks en gluonen in hadronen visualiseren (enige voorzichtigheid is geboden) als een collectie van draaiende tollens

zoals in Fig. 1. Wanneer ze allemaal in willekeurige richtingen draaien, is het niet mogelijk om een voorkeursrichting te identificeren; het gemiddelde van alle partonische spintoestanden is hetzelfde als voor het geval dat de partonen geen spin zouden hebben. Wanneer echter de spins, netto, in één specifieke richting wijzen (de partonen zijn *gepolariseerd*), heeft dat invloed op de distributies en dynamica van partonen in hadronen. Spineffecten kunnen asymmetrieën genereren die vervolgens bestudeerd en gekarakteriseerd kunnen worden.



Figuur 1: Een mand vol met tollen, net zoals de partonen met spin in het proton. Hun snelheidsverdelingen in de driedimensionale ruimte worden beschreven door de transversale-impuls-afhankelijke distributiefuncties, genaamd TMDs. De gecombineerde verdeling van twee tollen in de mand wordt beschreven door de dubbel-partondistributies (DPDs).

In dit proefschrift hebben we ons geconcentreerd op TMDs en DPDs om de eigenschappen van gepolariseerde quarks en gluonen in hadronen te bestuderen. We hebben onze resultaten in de verschillende hoofdstukken gepresenteerd en hieronder vatten we de meest relevante resultaten samen.

- TMDs: we hebben de TMDs bestudeerd die gluonen in hadronen beschrijven. De grootheden die gerelateerd zijn aan gluonen zijn moeilijk om te bestuderen omdat er weinig experimentele informatie beschikbaar is en worden erg belangrijk als de energie in een botsingsproces erg groot wordt. Op dit moment is er geen enkele bestaande faciliteit in de wereld die met dat soort energieën werkt. Voor de eerste keer hebben we TMDs gedefinieerd die relevant zijn voor de beschrijving van gepolariseerde gluonen in spin-1 hadronen (een voorbeeld

van zo'n hadron is het deuteron, een gebonden toestand van een proton en een neutron). We hebben tevens relaties tussen die TMDs afgeleid die nuttig zullen zijn voor toekomstige experimenten. Verder voorspellen we dat wanneer de botsingsenergie erg groot wordt, slechts enkele gluon TMDs een rol zullen spelen.

- DPDs: we hebben de correlaties tussen paren van quarks in het proton bestudeerd. Het uitbreiden van de beschrijving van één quark naar een paar van quarks levert ons een unieke mogelijkheid op om de structuur van hadronen met andere ogen te zien. Wederom is er weinig experimentele informatie beschikbaar over DPDs. We hebben het theoretisch kader bestudeerd dat correlaties tussen partonen beschrijft en we hebben in detail bekeken welke metingen met de Large Hadron Collider (LHC) in de nabije toekomst voor het eerst echt een signaal zouden kunnen bevatten dat duidt op correlaties tussen partonen.

Het resultaat van het combineren van verschillende partondistributies is vergelijkbaar met een mozaïek: elk stuk komt van een andere plek en neemt een relevante positie in, maar het uiteindelijke plaatje is pas compleet als alle tegels met elkaar gecombineerd worden.

